УДК 550.831

О некоторых особенностях 4D наблюдений силы тяжести

Дубовенко Ю.И., Черная О.А.

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, г. Киев, Украина

Introduced technique of 4D gravity monitoring is modified to be suitable for measurements on the short profiles. It is necessary to take into account gravity variations dependance from the weak intensive geophysical factors by the P. Dvulit's approach. A proper monitoring methodic is advisable to borrow from the quasiperiodic variations technique by the G. Sobakar. The interpretation procedure is supplied with the density calculation being presented by the solution of the indicators classification problem. Also it is useful to include into monitoring the additional vertical gravity gradient measurements to restore the upper part of geological cross-cut.

В работах [1, 2] представлены основания и области применения непрерывного гравиметрического мониторинга, являющегося модификацией высокоточных мелкомасштабных гравиметрических исследований на специально подготовленном изучаемом участке земной поверхности. Вкратце основные положения 4D гравимониторинга сводятся к следующему.

4D гравитационный мониторинг – ряд периодически повторяемых непрерывных на протяжении фиксированного времени микрогравиметрических измерений и превышений рельефа по данным GPS, а также их обработка с учетом влияния окружающей среды и сферы применений. Величину временного отрезка определяют требуемое качество (мера неопределенности) измерений и характер динамики (амплитуда и частота) поля. Физическая основа мониторинга – непрерывная связь динамики гравиполя и параметров среды: ундуляциям рельефа отвечают вариации силы тяжести, а пространственное распределение вариаций вертикальной производной V_z потенциала *коррелирует* с плоскостным распределением плотностей.

Классическая схема измерений на регулярной сети и перерасчет поля на основе интеграла Пуассона пригодны для региональных исследований. В локальных условиях (короткие профиля), где чаще применяют гравимониторинг [3], она имеет ряд недостатков [4]. Интерпретировать измерения на коротких профилях лучше на основе интегральных уравнений с быстро убывающими ядрами [4]:

$$S_{n+1}^{+}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{+}(\xi)\left(\mathrm{ch}\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{+}(x),\ S_{n+1}^{-}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{-}(\xi)\left(\mathrm{th}\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{-}(x)$$

$$\zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x)=v(x),\ \zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x),\ n=\overline{0,\infty}\,.$$

С учетом этих соотношений вполне можно применять методику [3] интерпретации гравианомалий (известны фон, *плотности* и *положения* на поверхности границ тяготеющих тел, имеющих общие контакты), состоящую из 3 процедур для восстановления плотности:

1. пространственный анализ Δg в VECTOR разделяет аномалии от тяготеющих тел и определяет *эффективные глубины* их залегания и *квазиплотности* – нулевое приближение.
2. решение плоской обратной задачи в GRPR2 дает *истинные глубины* и *плотности* тяготеющих тел – 1-е приближение модели.
3. пространственная плотностная модель среды в ADG-3D – окончательное решение.

Мы вместо VECTOR используем комплекс [5], а вместо GRPR2 – комплекс программ из [4].

Необоснованное упрощение моделей среды ради снижения неоднозначности искажает результат вычислений (геометрию источников, распределение плотности), особенно, в неоднородной среде. Надежное количественное истолкование возможно при заданной геометрии тяготеющих тел (по данным сейсмики) и комплексной интерпретации поля силы тяжести и деформаций рельефа.

Важно учитывать зависимость вариаций гравитационного поля от флуктуаций малоинтенсивных геофизических факторов. Учитывать эти эффекты при решении прямых задач гравиметрии на исследуемых территориях (считаем, что вследствие длительного мониторинга участка приблизительно известно его строение) можно путем внесения соответствующих поправок[1] [6] .

Следует различать слабоамплитудные аномалии и квазипериодические вариации силы тяжести. Для измерения последних создана своя методологическая (физико-химически и энергетически неоднородная модель Земли), методическая (вариации максимальны при пересечении разновозрастных тектонических структур и в областях контрастных современных вертикальных движений) и метрологическая (наблюдения на сети оптимальной плотности и конфигурации несколькими приборами, сравнение градиентов вариаций и наблюденных аномалий) база [7]. Эту методику целесообразно распространить и на 4D гравимониторинг. Вариации силы тяжести следует учитывать в интерпретации результатов 4D гравиметрии с целью введения соответствующих поправок в гравитационные съемки разных лет, в долговременную прецизионную топосьемку, уточнения реологии участка и др.

Согласно проведенным численным экспериментам, предлагается дополнить изложенную методику следующими положениями. Плотность в начальной модели среды предполагается задавать не функциональной зависимостью, как обычно, а определять как результат решения задачи классификации признаков по типу [8]. Вкратце алгоритм классификации тел по плотности в конечном слое выглядит следующим образом.

---

[1] за влияние аномальных атмосферных масс, снеговых масс, уровня грунтовых вод, лесистости и изменений рельефа вследствие техногенной деятельности.

Изучаемый разрез разбит на n слоев, в каждом из которых определено m блоков, внутри каждого блока плотность принимается постоянной. На этом множестве $\Sigma = \{\sigma_1, ..., \sigma_n\}$ из n слоев, каждый из которых описан m плотностями, нужно классифицировать блоки, т.е. расчленить множество на k непересекающихся множеств плотностей. Решаем задачу, исходя из того, что каждому образу в пространстве плотностей соответствует компактное множество. Определив диаметр множества Σ через $d(\Sigma) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{n} \rho(\sigma_i, \sigma_j) \Big/ c_n^2$, где $\rho(\sigma_i, \sigma_j)$ – расстояние между блоками, а мера компактности множества Σ – кучность $Q(\Sigma) = n/d(\Sigma)$, распределим множество на k блоков. Пусть каждому блоку отвечает центральная точка, к которой относим искомую плотность (точечное распределение масс):

1. в каждом блоке определяем пару точек, расстояние между которыми минимально, и объединяем их в группу, остальные (n – 2) точки считаем отдельными группами; имеем (n – 1) группу точек;

2. любую из групп, состоящих из 1 точки, объединяем с той группой, при объединении с которой кучность $Q(\Sigma_1, ..., \Sigma_{n-2}) = \sum_{i=1}^{n-2} Q(\Sigma_i)$ максимальна (из групп $\Sigma_1, ..., \Sigma_{n-2}$ после объединения состоит множество Σ, если Σ_j состоит из 1 точки, то $Q(\Sigma_j) = 0$); в итоге получим s групп ($k < s < n$), каждая из которых состоит не менее чем из 2 элементов;

3. из s групп выбираем 2 группы Σ_u и Σ_v, кучность объединения $Q(\Sigma_u \cup \Sigma_v)$ которых в сумме с кучностями всех остальных (s – 2) групп максимальна: $l, j \in \{\overline{1, s}\}$, $l \neq j$,

$$Q[u, v] = Q(\Sigma_u \cup \Sigma_v) + \sum_{i=1}^{s} Q(\Sigma_i) - Q(\Sigma_u) - Q(\Sigma_v) = \max\left[Q(\Sigma_l \cup \Sigma_j) + \sum_{i=1}^{s} Q(\Sigma_i) - Q(\Sigma_l) - Q(\Sigma_j) \right].$$

Эти группы Σ_u и Σ_v объединяем, количество групп становится (s –1); объединение продолжаем, пока число групп не станет равным: получим (s – l) компактных подмножеств, которые содержат блоки с минимально различными плотностями в каждом слое.

Каково же число блоков в слое? Производим объединение пар групп, пока не получим одну пару. Вычисляем разницу кучностей $\Delta Q_i = Q_{i+1}[u, v] - Q_i[u, v]$, $i = \overline{1, s-2}$, среди них выбираем наименьшую. Шаг, на котором ΔQ_i (градиент увеличения суммарной кучности групп) минимальна, отвечает нецелесообразному объединению, и счет останавливается: если $\Delta Q_l = \min \Delta Q_i[u, v]$, $i = \overline{1, s-2}$, то число классов на множестве A равно (s – l).

Полезно включить в мониторинг измерения вертикального градиента силы тяжести V_{zz}, поскольку доказана [9] его целесообразность при восстановлении слабо дифференцированной по плотности верхней части разреза. Поскольку вертикальный градиент – функция плотности и формы тела, то очаг разуплотнения под более плотным объектом создаст на поверхности его отрицательную аномалию. Зная распределение поля вертикального градиента силы тяжести, можно выявить очаг разуплотнения и определить его параметры.

Максимальный учет априорной информации о среде осуществляем, выбирая надлежащие модели среды [4] (звездные области известной плотности внутри компактных множеств в банаховом пространстве данных) и внедряя в функционалы типа невязки в регуляризирующих алгоритмах [10] дифференциальные стабилизаторы, собственные функции которых совпадают о собственными функциями исходных операторов [11].

Изложенные соображения проверены на модельных примерах, но требуется их экспериментальная проверка на полевых материалах.

1. *Дубовенко Ю.И., Черная О.А.* О роли 4D гравитационного мониторинга геологической среды в решении геоэкологических задач: XI Уральская молод. науч. школа по геофизике, 15-19 марта 2010 г., Екатеринбург. – Сб. тез. – Екатеринбург, 2010. – С. 101-103.

2.*Dubovenko Yu., Chorna O.* On the role of 4D gravity monitoring of geological media // Геофиз. журн. – 2010. – **32**, № 4. – С. 41-46.

3. *Болотнова Л.А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В. В. Филатов, Л. А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. - Г., 2007. - С. 43-44;

4. *Дубовенко Ю.И.* Определение контактной границы по значениям производных логарифмического потенциала на существенно ограниченных множествах: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. 04.00.22. К., 2005. - 19 с.

5. *Legostaeva O.V., Starostenko V.I., Yegorova T.P.* Automatized system of 3-D gravity modelling: the main principles and software // Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Annales Geophysicae, Part I, Supplement I.-1998.-V.16.-P.26;

6. *Двуліт П.Д.* Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі. – Дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01. / Львівська політехніка. – Львів, 1999. – 225 с.

7. *Собакарь Г.Т.* Квазипериодические вариации силы тяжести Земли, их природа и научно-прикладное значение // Геофиз. сб. АН УССР. – Вып. 46. – 1972. – С. 31-42.

8. *Литвинов А.Я.* Компактно группирующий алгоритм классификации геологических обьектов // Моделирование процесса анализа геолого-геофизической информации на ЭВМ. – Под ред. Г.И. Каратаева. – Минск, 1973. – С. 50-52.

9. *Сусин О.А., Антонов Ю.В., Слюсарев С.В.* Теоретические и практические аспекты микрогравиметрических исследований (Δg и V_{zz}-измерений) при решении геоэкологических задач // Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану геологічного середовища: Матер. II Міжн. наук. конф., Київ, 8-10.10.2001 р. – Київ, 2001. – С. 48-51.

10. *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. – М.: Наука, 1983. – 200 с.

11. *Черная О.А.* Исследование обратных задач теории логарифмического потенциала для тел, близких к заданным: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 04.00.22. / ИГФ НАНУ. – Киев, 1999. – 26 с.